

# 不均一性分布形電子装置の基礎的考察とその応用に関する研究

著者	鳥羽 喜富
号	374
発行年	1972
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9110">http://hdl.handle.net/10097/9110</a>

氏 名（本籍）	と ば し とみ 鳥 羽 喜 富 （長野県）
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 3 7 4 号
学位授与年月日	昭和 4 8 年 3 月 2 7 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 （博士課程）電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	不均一性分布形電子装置の基礎的考察とその応用 に関する研究  （主査）
論文審査委員	教 授 真野 国夫 教 授 斎藤 伸自 教 授 松尾 正之 教 授 西沢 潤一 助教授 高木 相

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

超小形電子回路に関する研究は今日長足の進歩をとげているが、そのうちアナログ回路では適切な周波数選択機能を有する装置を得ることが当面の重要な工学的問題の一つとなっている。

超小形電子回路に適した周波数選択回路の一つとして、古くから分布 R C 回路を用いる零回路が研究されている。しかし分布 R C 回路を用いた零回路は、半導体集積化に適當ではなく、また理論上、分布の不均一性による効果を実現することも困難なことが考察の結果明らかとなり、実際不均一分布の効果をも有する零回路はまだ構成されてはいない。

本論文は、不均一分布の効果をも有し、かつ半導体集積化に適した零回路の実現化に関し、半導

体内の少数キャリアの拡散およびドリフト現象を利用する分布形 2 端子対装置<sup>\*</sup> について基礎的に検討し、さらに不均一分布の効果の実現を図るべく基礎的考察を行なったものであり、また最適回路条件、温度補償法などを検討してこの装置の応用の基礎と具体案についても論及したものである。

## 第 2 章 分布形電子装置に関する従来の研究と本研究の立脚点

本章では、半導体分布定数形装置の歴史的背景となっている分布 RC 回路およびそれを用いた零回路、また超小形化に適した周波数選択回路としての半導体インダクタンスおよび半導体内の少数キャリアの拡散およびドリフト現象を利用したフィルタなどにつき、ことに分布の不均一性による効果の実現に関して従来の研究を概観し、考察を加え、本研究の立脚点を明確にした。

## 第 3 章 半導体分布定数形装置による零回路に関する理論的考察

本章では半導体分布定数形装置による零回路に関して基礎的な考察を行ない、それを基として装置の設計に関する基礎的な資料を得ることに努めた。

まず半導体分布定数形装置を用いるに適した零回路の構成を検討して零回路の基本的構成を得た。ついでこの回路の等価回路を定めてアドミタンスパラメータを求め、伝達関数、入出力インピーダンスなどの理論式を導いた。さらにこの式を用いて伝達特性に及ぼす寄生素子また回路パラメータの影響などを検討し、零回路に適した半導体分布定数形装置の構造を明らかにした。また、半導体分布定数形装置の場合、エミッタ障壁容量は殆んど特性に無関係となることを理論的に示し、この装置が一般のドリフト形トランジスタと設計基準において大きく異なることを明らかにした。

また、以上のような考察を通じて得られた構造の装置による零回路において、先きに導いた理論式を用いて不純物密度分布の不均一性による効果を計算し、その実現の可能性を指摘し、この装置によれば分布の不均一性による効果の実現が期待できることを理論上明らかにした。

## 第 4 章 半導体分布定数形装置による零回路の特性と最適動作回路条件

本章では前章の理論的考察に基づき試作された Si-pnp および npn 形の均一および不均一形半導体分布定数形装置を用い、前章で得た基本構成に従って零回路を構成し、その諸特性を測定してこれら装置の有為性および伝達特性における不均一形装置の均一形装置に対する優位性を明らかにした。また回路パラメータ依存性、入出力インピーダンスなどの測定結果を示すと共にこ

\* 本論文ではこれを半導体分布定数形装置と呼称する。

これらの諸特性の実測値と理論値を比較して前章の理論式の妥当性を検討した。その結果、均一形装置は前章で導いた理論式によりほぼ設計できることがわかった。ただし、不均一形装置については十分満足できる理論値と実測値の一致が見られなかったが、これに関しては第7章で検討を加えた。なお半導体分布定数形装置は基本的には電流伝達装置であるため、特性の測定にあたってその点に留意した電流伝達特性測定回路を零回路の周辺回路として設計・製作し、これを用いて諸特性の測定を行なった。

また、試作装置の測定結果から、前章で得た基本構成による零回路の外部接続回路条件に関し、最適動作状態が存在することがわかった。この状態では最も良好なノッチ特性が得られると共に回路パラメータ依存性も小となって動作が安定し、同時に外部接続容量の値が減少してより集積化に適した回路となるが、前章で得た理論式を用いて理論的にもこれらを確認することができた。また最適動作回路条件を満足する外部接続抵抗の値を理論的に求める方法も導いた。

## 第5章 半導体分布定数形装置による零回路の温度依存性

半導体装置の実用化において温度特性は重要な問題である。本章では試作装置の温度依存在の測定と理論解析を行ない、その結果に基づき、装置の温度特性の改善方法と補償方法を考察した。

すなわち、測定結果より試作装置の零周波数の温度依存性は、均一形装置では約 $-3,000$  PPM/ $^{\circ}\text{C}$ 、不均一形装置では約 $-800 \sim +200$  PPM/ $^{\circ}\text{C}$ であることがわかった。また基本構成における外部接続抵抗の値はある範囲で大なる程零周波数の温度特性は改善されることも明らかとなった。また入出力インピーダンスの温度による変動は零周波数を補償すれば同時に補償されることも明らかとなった。

零周波数の温度依存性の理論解析は、零周波数が陽関数として求められないので、前章および本章の種々の測定結果をもとにした近似計算により行なった。その結果、零周波数の単位温度当りの変化率は半導体分布定数形装置のベース不純物密度に依存し、不純物密度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で零となることがわかった。またこれは実測値からも確かめられた。

すなわち、温度特性を改善するにはベース不純物密度を $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上に大とする必要があり、均一形装置ではこの場合少数キャリアの注入効率が低下して特性が悪化することは第3章の理論的考察から明らかであり、したがってベース不純物密度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 付近の温度特性が良好な装置は不均一形装置でのみ実現可能となり、したがって温度依存性においても不均一形装置の優位性が明らかとなった。また外部接続抵抗の値についても理論解析の結果より温度依存性に関し改善方法が得られ、これは実験によっても確かめられた。

上述のような改善法に留意して設計された不均一形装置の温度依存性は約 $-300$  PPM/ $^{\circ}\text{C}$ となり、実用温度範囲では負の温度係数を有する容量を外部接続容量として用いることにより容易に温度特性を補償することが可能であった。また一般に温度依存性の大きな均一形装置の場合

には、サーミスタを含むアクタンス回路により等価外部接続容量を構成して温度補償することができた。以上のように、均一形・不均一形いずれの装置も温度特性を補償することができ、よってこれらの装置は実用に供しうることがわかった。

なお温度依存性の測定に際しては、周辺回路素子の温度特性が測定結果に混入しないような温度特性測定装置を考案し、これを用いた。

## 第 6 章 半導体分布定数形装置の応用

前章までに半導体分布定数形装置が実用に供されうることが明らかとなったので、本章ではこれらの装置の応用について考察した。

半導体分布定数形装置は基本的には電流伝達装置であるが、本章では電圧伝達特性を測定して、この装置が適用範囲で電圧伝達装置としても十分な特性が得られることを示した。その結果、この零回路をノッチフィルタとして、またその応用回路として用いる場合、適用範囲を拡大でき、より広範囲な応用が可能ながわかった。

さらに他の応用例として、ラウンド・トラピス形の FM 復調回路へ本装置を応用し、その結果、従来分布 RC 回路を用いては実現され得なかった分布の不均一性による効果を実現し、分布 RC 回路に対する半導体分布定数形装置の優位性を明らかにした。また、クォード・ラチュア形 FM 復調回路への本装置の応用例も示した。

その他、通過形ろ波器、発振器、可変定数形積分回路などへの応用に関して触れた。

## 第 7 章 総合的検討

本章では不均一形装置の均一形装置に対する優位性について総合的に検討した。

半導体分布定数形装置における不均一形装置の優位性は前章までに伝達特性と温度特性の両者において確認され、また一応用例としてとり挙げた FM 復調回路の復調感度においても認められた。しかし、不均一形装置の伝達特性の理論値と実測値には十分満足できる一致が見られず、したがって優位性の定量的考察は行えなかった。これは理論式の導入過程において、ベース内における拡散定数の不純物密度依存性を無視したことで、不純物密度の分布形を指数関数と近似したことが主な原因と考えられ、より近似度の高い理論式を求めることが今後の問題の一つと考えられる。しかし、これらを厳密に解析的に扱うことは困難と考えられるので、種々の物理定数を系統的に変えた試作装置により、実験的データを積み重ねて実験式を求めるのも一つの方法かと考える。

## 第 8 章 結 論

本章は各章の要点をまとめたものである。

以上述べたように，本研究は半導体集積化に適した半導体分布定数形 2 端子対装置の実用化と，分布定数形装置における不均一分布の効果の実現のための基礎的問題の考察を主眼とし，これを用いた零回路の伝達特性および温度特性などに留意した装置の設計法と最適動作回路条件の選定法に関して考察したものであり，さらに温度補償法なども検討して，半導体分布定数形装置の有為性，とくに不均一形装置の優位性を明らかにして，この装置の応用の基礎と具体案などを得ることに努めたものである。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始御指導を賜った真野国夫教授に，また御討論いただいた西沢潤一教授，松尾正之教授，斎藤伸自教授，高木相助教授に感謝する次第である。また日項有益な御助言と御援助を賜った三浦務元助教授（現ミツミ電機 K.K.）に感謝する次第である。

### 付録 1 分布 R C 回路における不均一分布の効果の実現性

ここでは第 1 章緒論に関連し，理論上良く知られている分布 R C 回路における不均一分布の効果の実現性について検討した。

まず分布 R C 回路の基本式を展開して，不均一性の種類によって分類し，その基本形について分布の不均一性による効果の実現性を検討し，結局分布 R C 回路によっては，この効果を電子回路において実現することは困難となることを述べた。

### 付録 2 分布 R C 回路の方程式

ここでは，付録 1 に関連し，単位体積中，単位時間に発生，消滅，流入，流出する電荷量から分布 R C 回路の基本的な方程式を導いた。

### 付録 3 不均一分布 R C 回路の入出力インピーダンス比

付録 1 に関連し，不均一分布 R C 回路の不均一性が大になるに従い入出力インピーダンスの比も大なることを数式と図表で示し，よって不均一性の大きな分布 R C 回路を電子回路に利用することは困難であることを述べた。

#### 付録4 分布RC回路の電圧と半導体内の少数キャリア密度の類似性—終端条件と分布に不均一性が存在する場合

境界条件が存在しない場合の分布RC回路の電圧と半導体内の少数キャリア密度の類似性は良く知られているが，ここでは第1章緒論に関連して終端条件と分布に不均一性が存在する場合を考察し，2，3の点に留意すれば，この場合にも上述の類似性を拡張して利用できることを明らかにした。

## 審 査 結 果 の 要 旨

半導体集積回路は近時飛躍的發展を遂げつつあるが、そのうちアナログ回路では適切な周波数選択機能を有する装置を得ることが一つの重要な課題である。本論分は零回路（伝達関数がある周波数で零となる回路）の実現化に関し、半導体内の少数キャリアの拡散およびドリフト現象を利用する分布形 2 端子対装置について基礎的に検討し、さらに不均一分布の効果を得るための考察を行ない、具体的な超小形電子装置の提案をしたもので、8 章および付録よりなる。

第 1 章は緒論である。第 2 章では、本研究に関連した従来の諸研究に関し検討を加えて本論文の立脚点を明確にしている。

第 3 章では、半導体内の少数キャリアの拡散およびドリフト現象を利用する分布定数形装置に関し基礎的考察を行ない、零回路に適した装置の基本的構成を得、そのアドミッタンスパラメータを求めて電流伝達関数、入出力インピーダンスなどの理論式を導いている。さらに特性に及ぼす寄生素子の影響、回路パラメータ依存性などについて検討し、ついで不純物密度分布の不均一性による効果について考察し、その実現の可能性を示している。これは新しい一つの知見である。

第 4 章では、前章の理論的考察に基づき試作した装置を示し、その諸特性を測定し、伝達特性における不均一形装置の優位性を示すと共に、測定結果と理論値とを比較して前章の理論式の妥当性を検討し、またこの装置の最適動作回路条件を考察している。

第 5 章では、これらの装置の温度依存性について実験とともに理論解析し、また温度依存性の改善のためには不均一形装置が均一形よりすぐれていることを示し、さらに温度補償回路を得、結果として、温度依存性の充分小さい装置が得られることを示している。半導体装置は温度依存性の避けられないものであるが、不均一形とすることによりこれを小さくできることを示していることは注目すべき成果である。

第 6 章では、以上の結果より、これらの装置の応用として、ノッチフィルタ、FM 復調器などの例を示し、可変定数形積分器その他への応用について示唆を与えている。

第 7 章では、半導体分布定数形装置における不均一性の効果に関し、総合的に検討し、優位性の条件、範囲などを示し、残された問題に論及している。

第 8 章は結論である。

以上要するに、本論文は半導体内の少数キャリアの拡散およびドリフト現象を利用した分布形 2 端子対装置で零回路を得ることについて理論的に考察し、不均一形の優位性を考究し、それらの実現化を図り、温度依存性を検討し、その補償回路を得るなど、零回路の集積回路化への実現性を求め、超小形アナログ回路の發展に関する一方向を示唆するなど半導体回路工学の進展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。